Aciers pour traitements thermiques

Mise en œuvre

par **Guy MURRY**
Ingénieur de l'École nationale supérieure d'électrochimie et d'électrométallurgie de Grenoble, Docteur-ingénieur
Ingénieur-conseil métallurgie et aciers
Ancien Directeur de l'Office technique pour l'utilisation de l'acier (OTUA)

1. Formage ..... M 4 532 - 2
1.1 Formage à chaud ..... — 2
1.2 Formage à froid ..... — 3
1.3 Formage à tiède ou à mi-chaud ..... — 4

2. Usinage ..... — 5
2.1 Usinage par enlèvement de copeaux ..... — 5
2.2 Usinages par électroérosion et par voie électrochimique ..... — 7

3. Soudage ..... — 8
3.1 Soudage avec métal fondu subsistant ..... — 8
3.2 Soudage sans métal fondu subsistant ..... — 9

4. Traitements thermiques ..... — 9
4.1 Traitements d'adoucissement ..... — 9
4.2 Traitements conférant des propriétés d'emploi dans la masse ..... — 10
4.3 Traitements conférant des propriétés d'emploi au voisinage de la surface ..... — 12

Pour en savoir plus ..... Doc. M 4 533

La mise en œuvre des aciers pour traitements thermiques pourra comporter, outre les traitements thermiques :

— du formage ;
— de l'usinage ;
— du soudage.

Nous examinerons donc dans cet article comment peuvent être obtenues et appréciées les performances qui permettront de réaliser ces opérations dans les meilleures conditions, étant donné que les modalités de la réalisation de ces dernières sont décrites dans les articles spécialisés de ce traité.

L'étude complète du sujet comprend les articles :

— M 4 530 - Aciers pour traitements thermiques. Propriétés et guide de choix ;
— M 4 531 - Aciers pour traitements thermiques. Normalisation ;
— M 4 532 - Aciers pour traitements thermiques. Mise en œuvre (le présent article) ;
— Doc. M 4 533 - Aciers pour traitements thermiques.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

1. Formage

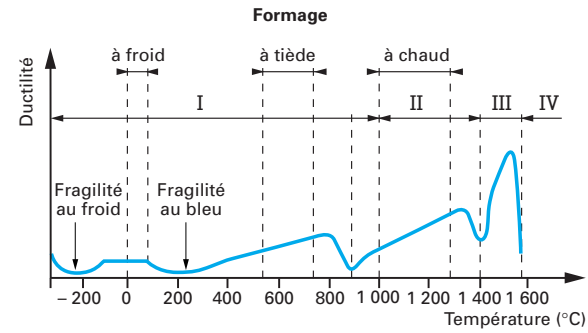
Le formage est réalisé, sans enlèvement de métal, par déformation plastique de l'acier.

Une telle opération est réalisable dans la mesure où le métal est suffisamment déformable. La courbe reproduite à la figure **1** permet de définir les trois domaines de température où cette condition pourra être considérée comme remplie :

— à chaud : à température supérieure à Ac_3, l'acier étant donc à l'état austénitique ;

— à froid, c'est-à-dire à la température ambiante ou légèrement au-dessus ;

— mais aussi à tiède ou à mi-chaud : entre 550 °C environ et Ac_1.



I et III phase α cubique centrée
II phase γ cubique à faces centrées
IV phase liquide
La courbe de ductilité est tracée en unité arbitraire

Figure 1 – Déformabilité de l'acier en fonction de la température
(d'après Oleg D. Sherly)

1.1 Formage à chaud

À chaud, c'est-à-dire à l'état austénitique, on pratique :

— le **forgeage libre** qui permet de déformer l'acier à l'aide d'outils simples agissant par pression ou percussion et qui conduit généralement à la réalisation d'une ébauche ;

— l'**estampage** (dit parfois **matriçage**) pendant lequel le métal est forcé (par choc ou par pression) entre des outils (matrices) comportant la gravure en creux de la pièce à réaliser.

Les conditions dans lesquelles ces procédés sont mis en œuvre sont décrites dans les articles *Forgeage à froid de l'acier* et [M 3 200] *Mise en forme de l'acier par estampage*. Nous nous intéresserons ici aux aspects qui mettent en cause le comportement de l'acier et qui leur sont généralement communs.

1.1.1 Facteurs importants au plan métallurgique

1.1.1.1 Structure initiale

Si l'acier, avant forgeage, est resté brut de solidification, il conserve sa structure dendritique (basaltique au voisinage de la peau, équiaxe dans la masse) avec les défauts inhérents à cette dernière, à savoir (cf. article [M 610] *Action du corroyage sur la structure de coulée des aciers*) :

— des grains grossiers qui ont la taille des dendrites ;

— des ségrégations mineures qui affectent le volume de chaque dendrite ;

— des rassemblements d'impuretés aux joints interdendritiques avec notamment présence de sulfures ;

— des porosités qui sont en fait des microretassures interdendritiques généralement closes et donc non oxydées ;

— parfois des fissures voisines de la peau, qui débouchent à l'atmosphère et dont les faces sont donc oxydées.

Tous ces défauts peuvent être atténués par un corroyage préalable : le forgeron peut donc trouver avantage à mettre en œuvre des demi-produits.

1.1.1.2 Chauffage à haute température avant forgeage

Ce chauffage va encore engendrer un grossissement du grain γ. La température ne doit pas être trop élevée au point de provoquer un début de fusion des zones interdendritiques et de la périphérie des dendrites. Le métal perd alors sa cohésion et devient impossible à déformer ; il est dit brûlé. L'oxydation superficielle, qui peut se produire en présence d'oxygène, engendre la formation d'une couche de calamine qui sera détachée au début du forgeage ; cet enlèvement de métal peut permettre l'élimination des défauts superficiels.

1.1.1.3 Déformation à haute température pendant le forgeage

Cette déformation plastique a plusieurs conséquences :

— allongement des dendrites (surtout les dendrites équiaxes) dans le sens de la déformation ; elles prennent la forme de fibres ou de fuseaux à la périphérie desquels se répartissent les ségrégations et les impuretés. Ce processus donne naissance au fibrage visible sur une coupe pratiquée selon le sens long (sens préférentiel de déformation) et qui suit les variations de section imposées par les changements de forme ;

— possibilité de restauration, voire de recristallisation (si la déformation est suffisante) et donc d'affinement du grain γ ;

— allongement des inclusions plastiques (sulfure de manganèse et silicates basiques surtout) qui vont prendre la forme de fils ou de feuilles susceptibles d'altérer la cohésion du métal lorsque celui-ci sera sollicité perpendiculairement à la ou aux grandes dimensions de ces inclusions déformées ; ainsi apparaît l'effet travers (altération de la plasticité dans le sens perpendiculaire à celui de la déformation principale) ;

— cavitation par décohésion aux extrémités des inclusions peu déformables ;

— fermeture des porosités non débouchantes et resoudage engendrant donc une amélioration de la cohésion du produit ;

— ouverture (généralement) des cavités et fissures débouchantes avec risque de propagation voire de rupture.

1.1.1.4 Refroidissement après forgeage

L'état structural après retour à la température ambiante dépend des conditions de refroidissement. Mais la taille des grains γ intervient sur la trempabilité et les segrégations qui subsistent engendrent des variations locales de cette dernière, variations qui peuvent être importantes et conduire, selon les conditions de refroidissement, à des structures différentes. Après un refroidissement relativement lent, les zones appauvries seront plus riches en ferrite, les zones enrichies plus riches en perlite par exemple. La déformation aidant, ces zones à structures différentes s'allongent dans le sens de la déformation et génèrent ainsi la structure en bandes qui apparaît lorsque les conditions de refroidissement rendent sensibles des différences de trempabilité et n'apparaissent plus quand il en est autrement (structure totalement martensitique par exemple dans laquelle ne seront sensibles que les écarts de dureté dus à la ségrégation du carbone).

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

Tableau 1 – Influence des conditions de forgeage sur la grosseur des grains d'austénite

Acier	Température avant forgeage (°C)	Nombre des opérations	Indice AFNOR de taille des grains γ	Diamètre moyen des grains γ (µm)	Dureté HB sur pièces en essais	Dureté HB à l'état normalisé sur barres
C42	1 250	5	1 à 4	250 à 88	198 à 199	170 à 210
	1 200	5	2 à 5	177 à 62	190 à 203	
	1 150	7	3 à 6	125 à 44	202 à 212	
	1 100	7	6 à 7	44 à 31	190 à 207	
C42	1 220	8	1 à 3	250 à 125	207 à 212	170 à 210
	1 220	8 (*)	6 à 8	44 à 22	180 à 226	
	1 100	8	3 à 4	125 à 88	222 à 226	
	1 000	8	4 à 5	88 à 62	219 à 224	
	800	8	> 8	< 22	180 à 226	
42Cr1	1 250	7	3 à 5	125 à 62	225	175 à 215
	900	7	> 8	< 22	205	

(*) Avec arrêts intermédiaires pour abaisser la température.

1.1.2 Conséquences concernant l'acier

■ Il est intéressant de forger un acier qui soit le plus homogène possible avec peu d'inclusions (et des inclusions peu plastiques). Une meilleure homogénéité initiale peut être obtenue en forgeant un acier préalablement corroyé.

■ La profondeur des défauts de surface doit être limitée afin de permettre leur élimination lors du chauffage et de la formation de la couche de calamine.

■ La déformation doit être suffisante pour refermer les porosités, affiner le grain et faciliter l'homogénéisation en diminuant les distances sur lesquelles doit se faire la diffusion (allongement et donc amincissement des dendrites). Pour apprécier son importance, on utilise le **taux de corroyage**, rapport de la section initiale S_0 à la section finale S :

$$\text{taux de corroyage} = S_0/S$$

L'expérience a montré qu'un taux de 4 à 10 était nécessaire pour du métal brut de solidification en lingotière ; ce taux n'est par contre que de 3 à 7 pour du métal issu de coulée continue (cf. article « Action de corroyage sur la structure de coulée des aciers » dans le présent traité). Il faut noter qu'un corroyage élevé peut, en augmentant la déformation des inclusions, accroître le phénomène du travers et donc rendre le métal anisotrope. Par ailleurs, en forgeage, il faut tenir compte des irrégularités locales du taux de corroyage dues aux variations de forme de la pièce forgée ; cela peut conduire à réaliser (au cours de la même chaude), dans les zones peu déformées, un préforgeage qui assure le corroyage nécessaire.

■ Il peut être utile, pour affiner la taille des grains austénitiques du métal (et donc aussi la taille des grains après transformation), de provoquer une recristallisation efficace et, pour ce faire, de forger et surtout de finir le forgeage à relativement basse température. Le tableau **1** donne quelques exemples de résultats que l'on peut ainsi obtenir.

■ Il est possible, à la fin de l'opération de forgeage, de réaliser un refroidissement judicieusement choisi pour obtenir une structure visée (traitement thermique dit dans la chaude de forge) et éviter ainsi d'avoir recours à un traitement thermique ultérieur. Pour ce faire, il est souhaitable de choisir des conditions de forgeage qui permettront d'obtenir un grain γ correctement affiné et de procéder ensuite, dès la fin du forgeage (pour éviter un nouveau grossissement du grain γ au cours d'un séjour à haute température), au refroidissement convenable (cf. article *Traitements thermiques associés au forgeage des aciers de construction* dans le présent traité). Ces opérations sont déterminantes pour l'obtention des caractéristiques d'emploi des aciers de type ferrite-perlite aptes au durcissement par précipitation à partir des températures de formage à chaud tels qu'ils sont décrits par la norme NF EN 10267. Le refroidissement rapide initial doit alors être interrompu de telle sorte que l'austénite se transforme en ferrite (avec précipitation interphase de carbures) et perlite en conditions quasi-isothermes dans un intervalle de température compris approximativement entre 600 et 550 °C.

■ Il faut noter aussi que le **fibrage** est une traduction des ségrégations. De par son orientation, il participe à la détérioration des propriétés dans le sens travers du métal et, de ce fait, ne peut être considéré comme une qualité que lorsque la pièce n'est pas sollicitée selon cette direction.

■ Enfin, le fait de porter le métal à haute température expose ce dernier à des risques d'altérations de surface par réaction avec l'air ambiant et apparition d'une décarburation.

1.2 Formage à froid

Toujours obtenu par écoulement plastique du métal, le formage à froid est dit :

— **forgeage à froid** ou **extrusion** lorsque, partant d'un lopin d'acier, on force ce dernier à occuper le volume libre à l'intérieur d'un outillage qui doit présenter au moins deux plans de symétrie parallèles à l'axe d'application de l'effort ;

— **frappe à froid** lorsque, partant d'un morceau de fil machine [produit laminé et enroulé à chaud en couronnes à spires non rangées et dont la section peut être circulaire, ovale, carrée, rectangulaire, hexagonale, cotogonale, demi-ronde... sa surface étant lisse (NF EN 10079) et sa dimension nominale pas inférieure à 5 mm], on le déforme en l'air ou en matrice fermée en une ou plusieurs opérations pour lui conférer la géométrie visée (cf. article *Frappe à froid de l'acier*).

Ces procédés de formage exigent du métal le respect de certaines exigences (quantifiées par la norme NF EN 10263).

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

1.2.1 Malléabilité des aciers

L'acier doit, tout d'abord, être très malléable. En général, les spécialistes considèrent que cette qualité est obtenue si la limite d'élasticité est minimale et la ductilité grande ; ils demandent, pour ce faire, que l'acier ait une structure constituée par de la ferrite en proportion maximale et des carbures les plus coalescés possible. L'intérêt porté à ce type de structure est en désaccord avec le choix des tréfileurs qui, visant eux aussi la ductilité maximale (pour pouvoir conduire le tréfilage jusqu'aux plus faibles diamètres), préfèrent un état ferrito-perlitique fin, c'est-à-dire des structures formées aux plus basses températures du domaine supérieur de transformation pour lesquelles la proportion de ferrite est plus faible qu'à l'équilibre. Ce maximum de plasticité ne coïncide pas avec le minimum de limite d'élasticité (l'effet durcissant de la finesse des grains ferritiques est sensible) et de ce fait les efforts de formage ne sont plus minimisés.

La **globulisation des carbures** permet de réduire leur effet durcissant. Plus que par le niveau de la limite d'élasticité, le résultat est généralement jugé à partir de la résistance à la traction, comme l'a fait, par exemple, Mathon [14] qui a défini la **résistance à la traction minimale théorique** à laquelle doit conduire un traitement de globulisation (ou **coalescence**) :

$$R_m\ (\mathrm{N/mm^2}) = 226 + B/C + A$$

avec $A = 255\ [(\mathrm{C\%}) - 0{,}1]$,

$B = 294\ (\mathrm{Cu\%}) + 147\ (\mathrm{Si\%}) + 44\ (\mathrm{Ni\%}) + 108\ (\mathrm{Mn\%})\ [1 - (\mathrm{C\%})]$,

$C = 1 - 0{,}15\ (\mathrm{C\%})$

Ce résultat met en évidence l'effet nocif des éléments qui durcissent la ferrite en restant en solution solide. Un acier destiné au formage à froid devra donc contenir le minimum de Cu, de Si, mais aussi de P et, dans la mesure du possible, de Mn et de Ni.

La malléabilité des aciers dépend aussi de leur état inclusionnaire. Des inclusions d'alumine (en alignements) et de sulfures (déformés au cours du laminage à chaud) constituent, au cours du formage à froid, des sites d'amorçage de fissures pouvant entraîner le rebut de la pièce, mais aussi sa rupture en cours de fabrication. Pour améliorer la malléabilité des aciers, les sidérurgistes diminuent donc la teneur en oxygène du métal liquide (métallurgie en poche), traitant l'acier liquide avec des produits à base de calcium qui transforment les inclusions d'alumine en aluminates de chaux moins nocifs et réduisent la teneur en soufre. Il n'est toutefois pas possible de supprimer totalement tout ajout d'aluminium qui doit intervenir dans le calmage de l'acier en lieu et place du silicium prohibé pour sa capacité de durcissement de la ferrite.

1.2.2 États de surface

L'acier doit présenter un état de surface convenable (défini par les normes). En effet les défauts superficiels tels que lignes, fissures, rayures, traces de manutention, constituent des amorces de fissuration qui compromettent la mise en forme.

1.2.3 Géométrie précise des produits

Les produits en acier dans lesquels sont découpés les lopins doivent avoir une géométrie précise afin de limiter les écarts de masse et éviter ainsi des écarts dimensionnels importants sur les pièces (et ne pas faire courir aussi le risque de soumettre les outillages à des efforts exagérés en cas d'excès de métal). L'étirage permet d'améliorer la précision géométrique de la section (mais il durcit par écrouissage) ; l'écroûtage offre l'avantage de parvenir à la fois à une géométrie plus précise et à une suppression des défauts de surface.

1.2.4 Traitement superficiel

L'acier doit souvent être traité superficiellement pour améliorer son comportement au frottement dans les outillages sous les hautes pressions qui apparaissent. En général, il est phosphaté, la couche de phosphate (de Zn ou de Mn) est déjà lubrifiante par elle-même, elle a aussi l'avantage de retenir les produits lubrifiants apportés pendant le formage.

1.2.5 Traitement de régénération

Si l'acier s'est trop écroui pendant le formage ou s'il doit être adouci, il est nécessaire de procéder à un traitement de régénération qui sera, selon les performances attendues, soit un traitement de restauration (vers 500 °C), soit un traitement de recristallisation (entre 650 °C et Ac_1).

1.3 Formage à tiède ou à mi-chaud

Ce procédé peut constituer un compromis parfois intéressant entre les avantages et les inconvénients des formages à chaud et à froid.

En effet, il devrait assurer :

— par rapport au formage à chaud :
- une économie d'énergie thermique,
- une meilleure approche des cotes finies,
- un moins grand risque d'altération superficielle (oxydation, décarburation...) ;

— par rapport au formage à froid :
- une déformabilité plus grande,
- de moins fortes sollicitations des outillages.

A contrario, on peut, bien entendu, remarquer que la forgeabilité sera moins grande qu'à chaud, que les efforts de formage seront plus élevés, les sollicitations des outillages plus importantes et que, par ailleurs, les risques de fissuration pourront être plus grands.

En fait, on doit noter que la **nocivité des défauts superficiels** est pratiquement aussi importante que pour le formage à froid et que les exigences sur ce point devront donc être aussi sévères.

Les **températures de formage** se situent entre deux barrières ; elles doivent être :

— inférieures à la température (Ac_1) de début de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$. Cette règle est d'autant plus impérative que la teneur en soufre de l'acier est plus élevée ; cette température Ac_1 peut être estimée à l'aide de diverses formules empiriques :

$$Ac_1\ (^\circ\mathrm{C}) = 723 - 10{,}7\ (\mathrm{Mn\%}) - 16{,}9\ (\mathrm{Ni\%}) + 29{,}1\ (\mathrm{Si\%}) + 16{,}9\ (\mathrm{Cr\%}) \quad [1]$$

$$Ac_1\ (^\circ\mathrm{C}) = 739 - 22\ (\mathrm{C\%}) - 7\ (\mathrm{Mn\%}) + 2\ (\mathrm{Si\%}) - 13\ (\mathrm{Ni\%}) + 14\ (\mathrm{Cr\%}) + 13\ (\mathrm{Mo\%}) + 20\ (\mathrm{V\%}) \quad [12]$$

$$Ac_1\ (^\circ\mathrm{C}) = 747 - 17{,}4\ (\mathrm{Mn\%}) - 24{,}8\ (\mathrm{Ni\%}) + 13{,}3\ (\mathrm{Cr\%}) + 18{,}4)\ (\mathrm{Mo\%}) \quad [13]$$

— supérieures aux températures auxquelles se manifeste la **fragilité au bleu** (baisse de ductilité liée à un vieillissement dynamique), soit supérieures à 550 °C environ. La figure **2** [14] met en évidence, d'une part, le domaine de température dans lequel ce phénomène se fait sentir et, d'autre part, l'influence de l'azote.

Les courbes reproduites sur la figure **3** rassemblent des résultats d'essai d'écrasement réalisés à différentes températures sur divers aciers. Elles indiquent les risques de fissuration encourus au cours d'une déformation à mi-chaud et montrent que, pratiquement,

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

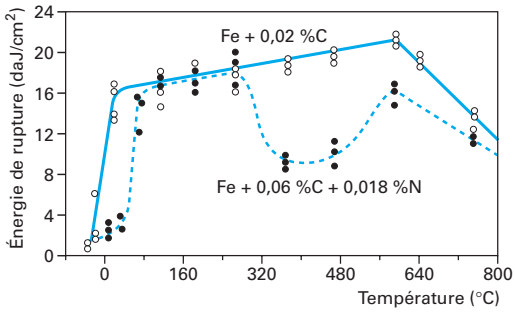
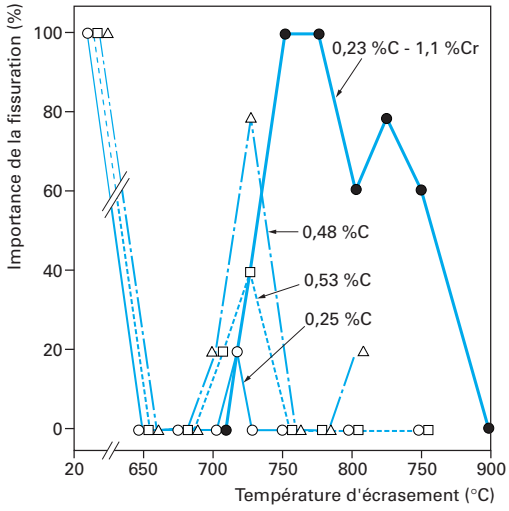


Figure 2 – Variation, en fonction de la température d'essai, de l'énergie de rupture de deux aciers non alliés à basses teneurs en carbone (d'après [14])

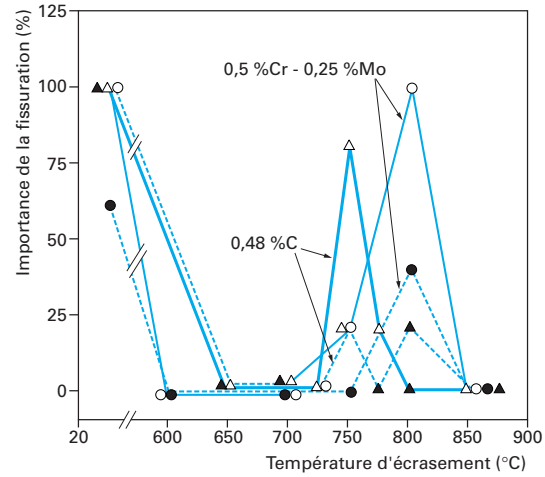


L'importance de la fissuration est estimée par rapport à un état de référence à 20 °C

Figure 3 – Évolution de la fissuration en fonction de la température d'essais d'écrasement réalisés sur des aciers non alliés et sur un acier faiblement allié (d'après Kobe Steel)

l'intervalle de température optimal pour mettre en forme à tiède se situe entre 650 et 700 °C. La figure **4** empruntée à la même publication montre que ces limites ne semblent pas évoluer avec l'état structural initial des aciers. Il est intéressant de noter que, dans cet intervalle de température, la limite d'élasticité des aciers non ou peu alliés est très inférieure à ce qu'elle est à 20 °C ; le rapport limite d'élasticité à chaud/limite d'élasticité à 20 °C est, par exemple de l'ordre de 0,1 à 0,4 pour des aciers non alliés et de 0,2 à 0,5 pour des aciers faiblement alliés du genre CrMo4.

En formage à mi-chaud, on retrouve l'influence néfaste des inclusions ; le problème sera traité comme pour le formage à froid (cf. § 1.2).



L'importance de la fissuration est estimée par rapport à un état de référence à 20 °C

△,○ état brut de laminage
▲,● état globulisé

Figure 4 – Évolution de la fissuration en fonction de la température d'essais d'écrasement réalisés sur un acier non allié et un acier faiblement allié pour différents états structuraux (d'après Kobe Steel)

2. Usinage

La mise en forme par enlèvement de matière est très pratiquée en mécanique. Elle se fait surtout par enlèvement de copeaux avec des outils dits « coupants » mais, notamment sur des aciers très durs, elle peut aussi se faire par électroérosion et par voie électrochimique.

2.1 Usinage par enlèvement de copeaux

Fondamental en fabrications mécaniques, l'usinage par enlèvement de copeaux a beaucoup progressé avec le développement de moyens d'usinage très performants et l'introduction de l'informatique (nouveaux outils, centres d'usinage, commandes numériques, ateliers flexibles, etc.). Ces évolutions ont justifié les travaux réalisés pour améliorer l'usinabilité des aciers. F. Leroy fait un point complet des connaissances et des évolutions dans ce domaine dans l'article *Usinage et usinabilité*. Nous ne reprendrons ici que les points concernant les performances des aciers et le choix des solutions.

On sait que l'usinabilité d'un acier dépend de :

— sa dureté ;
— son état structural ;
— son état inclusionnaire.

2.1.1 Influences de la dureté et de l'état structural

Ces deux influences se confondent pratiquement. Il est toujours possible de tracer une courbe représentant, pour les aciers de construction mécanique, l'évolution d'un indice d'usinabilité en fonction de la dureté (figure **5**). Une telle courbe montre que,

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

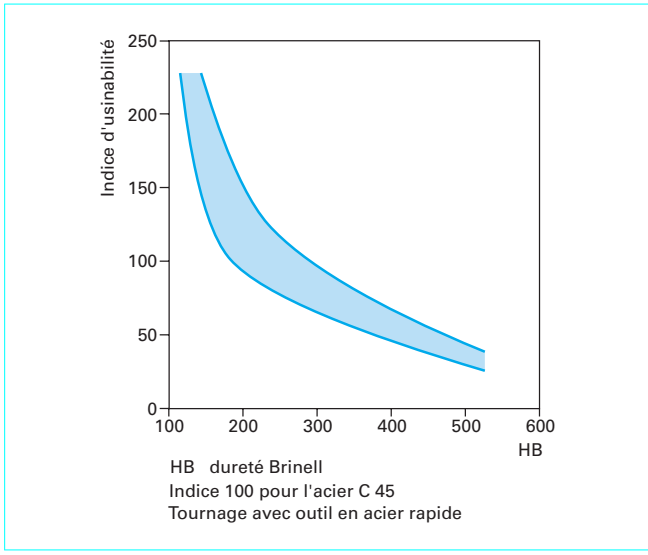


Figure 5 – Évolution de l'indice d'usinabilité de divers aciers à 0,014 ⩽ S % ⩽ 0,030 en fonction de leur dureté

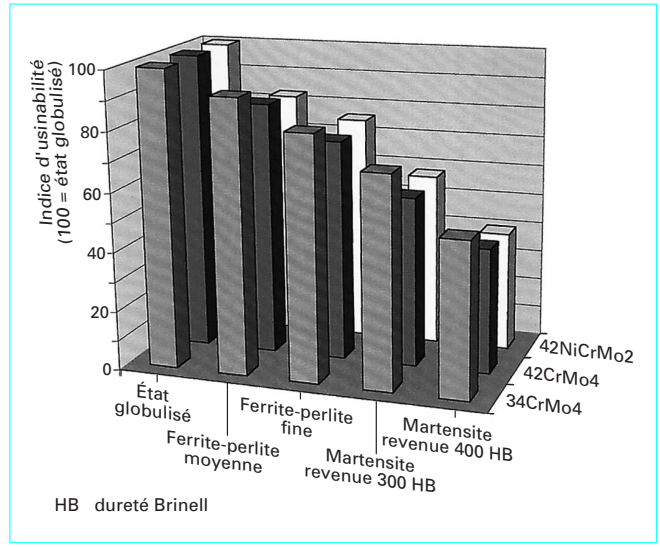


Figure 7 – Influence de l'état structural de 3 aciers sur leur usinabilité relative en tournage avec outil *carbure* (l'indice 100 correspond à l'état globulisé)

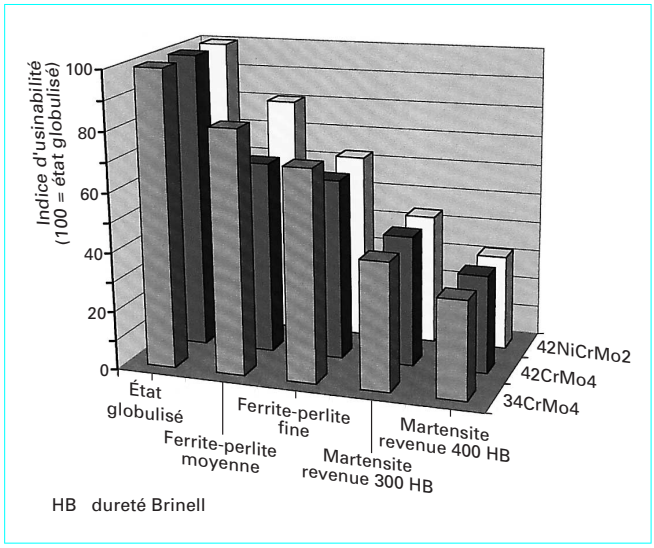


Figure 6 – Influence de l'état structural de 3 aciers sur leur usinabilité relative en tournage avec outil en *acier rapide* (l'indice 100 correspond à l'état globulisé)

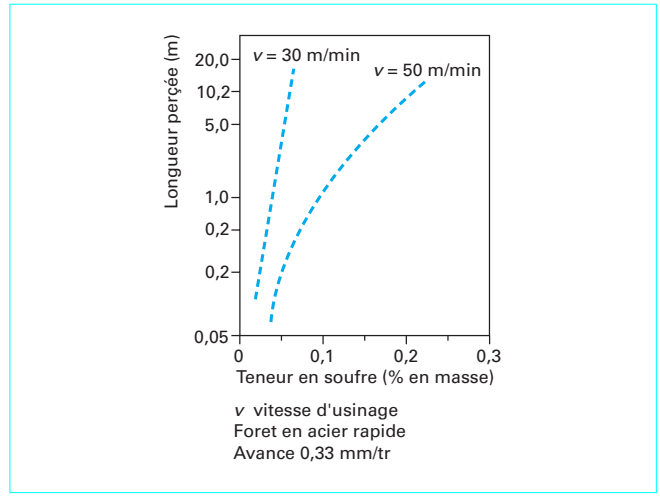


Figure 8 – Influence du soufre sur l'usinabilité (en perçage) d'aciers à 0,45 % C calmés Al-Si (d'après [15])

globalement, l'usinabilité décroît quand la dureté augmente. Comme la dureté dépend de l'état structural, on constate que l'influence de ce dernier est tout à fait comparable comme le montrent les figures **6** et **7**. Cependant, on doit noter que la prise en compte des constituants et de leur morphologie permet d'expliquer (ce que ne peuvent faire les variations de dureté) des différences d'usinabilité lorsque celle-ci est définie non seulement à travers les performances de vitesse et d'enlèvement de matière mais en fonction d'autres paramètres (états de surface obtenus, facilité de fragmentation des copeaux). C'est ainsi que les structures globulisées ne sont pas toujours les plus intéressantes lorsque l'on recherche une certaine qualité de surface (rugosité limitée) et une évacuation facile des copeaux (on préfère alors les structures ferrito-perlitiques fines).

Mais on constate aussi que ces descriptions souffrent d'une dispersion qui indique que cette analyse manque de finesse et néglige des facteurs importants. Le plus important d'entre eux est l'état inclusionnaire dont on doit analyser l'influence en distinguant les différents types d'inclusions : sulfures, plomb ou oxydes.

2.1.2 Influence de l'état inclusionnaire

2.1.2.1 Influence des sulfures

Elle est déterminante. La figure **8** en donne un exemple tiré d'essais de perçage [15]. On voit que de faibles variations de la

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

teneur en soufre font évoluer l'usinabilité dans des proportions importantes (la variation relative est d'autant plus forte que la teneur en soufre est faible). Mais l'addition du soufre affecte sensiblement la plasticité de l'acier quand celui-ci est sollicité perpendiculairement au sens de laminage (phénomène dit de « travers » d'autant plus sensible que les sulfures ont été plus déformés dans ce sens). Cet effet néfaste peut être corrigé si le sidérurgiste fait en sorte que les sulfures soient peu (ou pas) déformables (sulfures dits alors globulisés).

2.1.2.2 Influence du plomb

Le plomb est utilisé pour améliorer l'usinabilité des aciers. Pratiquement insoluble dans le fer, le plomb constitue des inclusions métalliques dont l'effet est voisin de celui des sulfures (avec une action de lubrification plus marquée). Difficiles à fabriquer (les inclusions de Pb doivent être fines et bien dispersées dans toute la masse du métal), ces aciers sont aussi sensibles à un effet de « travers » qui affecte la plasticité lorsque le métal est sollicité perpendiculairement au sens de laminage et que les inclusions ont été très déformées dans ce sens.

2.1.2.3 Influence des oxydes

Les oxydes constituent des inclusions plus ou moins abrasives. Ils peuvent intervenir, en ce qui concerne l'usinabilité :

— comme éléments destructeurs de l'outil (surtout si celui-ci est en acier rapide) ; c'est le cas surtout des inclusions à base d'alumine et des alignements qu'elles peuvent former ;

— comme éléments protecteurs de l'outil ; c'est le cas notamment des silicates vis-à-vis des outils en carbures ; aux grandes vitesses de coupe, la température régnant à l'interface outil-copeau est voisine de la température de ramollissement de ces inclusions ; celles-ci constituent alors un dépôt adhérent à la surface de l'outil et ralentissent de ce fait son abrasion par le copeau.

Ces remarques conduiraient à rejeter l'aluminium comme élément intervenant au cours de l'élaboration de l'acier ; mais son emploi présente des avantages importants par ailleurs. Une solution a été trouvée qui consiste en un traitement du métal liquide par le calcium qui modifie la morphologie de l'alumine et engendre, par ailleurs, la formation d'inclusions mixtes dans lesquelles l'alumine est enrobée par les sulfures. La figure **9** montre l'efficacité de ce procédé.

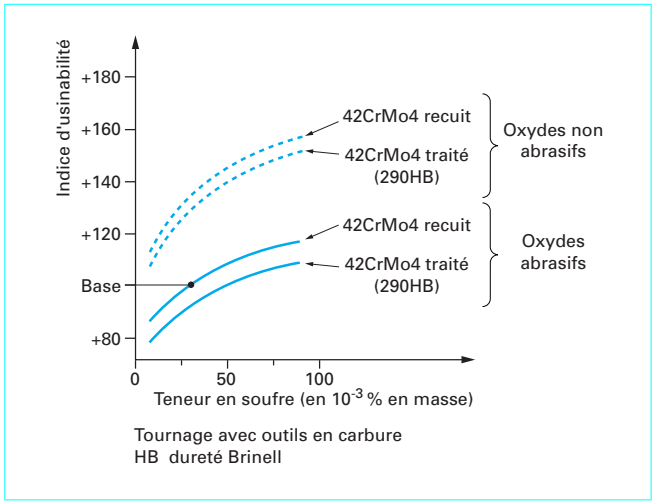


Figure 9 – Variation de l'usinabilité en fonction du traitement des oxydes et influence du soufre

2.1.3 Variété des solutions

L'ensemble de ces considérations explique la variété des solutions qui sont proposées, par les normes de produits, à l'usineur soucieux de disposer d'aciers facilement usinables :

— possibilité de livraison, à la demande, d'aciers traités thermiquement pour usinage (avec dureté garantie) ou d'aciers adoucis (avec dureté maximale garantie), voire d'aciers recuits présentant un état structural défini ;

— possibilité d'avoir une fourniture d'aciers à teneur en soufre sur produit comprise entre 0,015 et 0,045 % (aciers non alliés dont la désignation comporte le suffixe R et aciers alliés dont la désignation comporte la lettre S ; exemples C35R et 34CrMoS4) ;

— possibilité, sur accord à la commande, d'avoir une fourniture d'acier à usinabilité améliorée :

- soit par augmentation de la teneur en soufre sur produit jusqu'à 0,100 % avec morphologie contrôlée des sulfures. La globulisation des sulfures, indispensable, permet de conserver au métal les propriétés mécaniques garanties avec des teneurs en soufre plus faibles,
- soit par addition de plomb,
- soit par traitement des oxydes au calcium.

Ces solutions peuvent être retenues individuellement ou cumulées ;

— possibilité d'approvisionner des aciers spéciaux de décolletage définis par la norme NF EN 10087 qui attire l'attention sur le fait que certaines propriétés de ces aciers peuvent être affectées par les fortes additions de soufre et autres éléments (Pb) améliorant l'usinabilité. Leur emploi doit donc être envisagé avec prudence.

2.2 Usinages par électroérosion et par voie électrochimique

L'électroérosion et l'usinage électrochimique consistent à reproduire, par plongée, la forme d'une électrode-outil dans un bloc de métal. Toutes deux permettent l'usinage d'aciers durcis difficiles à usiner par enlèvement de copeaux.

2.2.1 Enlèvement de matière par électroérosion

La pièce à usiner et l'électrode-outil (elle-même généralement en cuivre ou en graphite) sont plongées dans un liquide diélectrique (en général un hydrocarbure) et soumises à des décharges électriques engendrées par un générateur à impulsions. Les étincelles qui jaillissent provoquent localement la fusion et l'ébullition des matériaux constituant la pièce et l'électrode. Le déplacement de cette dernière est piloté de telle sorte que la distance entre elle et la pièce reste constante et de l'ordre de quelques centièmes à quelques dixièmes de millimètre. Les métaux enlevés sont évacués sous forme de fins globules par la mise en circulation du liquide diélectrique. Le débit de matière est d'autant plus grand que la durée des décharges électriques est plus courte, mais la rugosité résultante s'en trouve dégradée. Ainsi, un débit de 0,5 à plusieurs cm^3/min conduira à une rugosité *Ra* élevée de l'ordre de 20 à 35 µm tandis qu'un débit de 1 à 50 mm^3/min permettra d'atteindre un *Ra* de 0,5 à 2,5 µm. On passe ainsi d'un usinage d'ébauche à un usinage de finition.

En surface de la pièce usinée, on constate la présence d'une zone affectée qui comporte :

— une zone, la plus extérieure, constituée par du métal fondu et résolidifié, l'acier pouvant être enrichi en carbone (provenant du diélectrique) ;

— une zone durcie qui a été austénitisée puis trempée au cours du cycle thermique engendré par chaque décharge ;

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

— éventuellement, en profondeur, une zone adoucie par effet de sur-revenu (sa présence dépend de la stabilité de la structure du métal de base).

L'épaisseur de la totalité de la zone perturbée varie de quelques centaines de micromètres en usinage d'ébauche à quelques micromètres en usinage de finition.

Dans la mise en œuvre de ce procédé, il faut noter que l'usinabilité des aciers ne dépend pas de leurs propriétés mécaniques, ce qui permet l'usinage d'aciers traités et très durs.

2.2.2 Enlèvement de matière par voie électrochimique

Entre la pièce à usiner qui constitue l'anode et l'électrode-outil (elle-même généralement en cuivre ou en acier inoxydable) qui constitue la cathode, on applique une tension électrique continue et on fait circuler un électrolyte (généralement une solution aqueuse de chlorure ou de nitrate de sodium) pour réaliser la dissolution anodique du métal de la pièce. Le déplacement de l'électrode-outil est piloté de telle sorte que la distance entre elle et la pièce reste constante et de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre. Le métal enlevé est évacué sous forme d'ions par la mise en circulation de l'électrolyte (ces ions sont précipités par ailleurs pour régénérer l'électrolyte). L'électrode-outil ne subit aucune attaque chimique, mais elle peut être le siège d'un dégagement gazeux (hydrogène).

Le débit de matière est d'autant plus grand que la densité du courant continu est plus élevée (la vitesse d'usinage peut atteindre plusieurs millimètres par minute). La rugosité résultante *Ra* est de l'ordre de 0,2 à 3 µm (elle peut être améliorée par l'utilisation d'un courant pulsé).

La géométrie de l'électrode-outil demande une mise au point particulière du fait que sa distance à la pièce, en chaque point, dépend de l'orientation de son déplacement par rapport à la surface usinée.

Dans la mise en œuvre de ce procédé, il faut noter que les carbures lamellaires présents se dissolvent mal et provoquent des défauts de rugosité. Les résultats sont d'autant meilleurs que les carbures précipités sont plus fins et bien répartis (il en est ainsi pour les aciers trempés et revenus).

3. Soudage

Le soudage est une technique d'assemblage qui reconstitue la continuité métallique entre deux éléments d'un ensemble. Son utilisation en construction mécanique permet :

— la réalisation de pièces complexes ;
— de diminuer les chutes (copeaux, bavures...) en fabrication ;
— de s'affranchir de certaines contraintes liées au forgeage et au moulage (dépouille...).

Il conduit souvent à une meilleure utilisation du métal qu'il est possible de ne mettre que là où il est nécessaire (d'où des gains de masse).

Mais il crée des effets thermiques localisés importants et engendre, de ce fait, des transformations, des déformations et des contraintes résiduelles que le mécanicien doit maîtriser. Cependant la situation devient très favorable lorsque, comme cela est souvent le cas en mécanique, un traitement thermique complet est réalisé après soudage.

Tout ce qui concerne les procédés de soudage et leur utilisation est décrit dans la rubrique *Soudage* du traité Génie mécanique. Nous n'évoquerons ici que celles de leurs particularités qui sont susceptibles d'intervenir dans le choix de l'un d'entre eux. Mais à ce stade, et compte tenu des exigences de la construction mécanique, il est judicieux de distinguer les procédés de soudage qui laissent ou, au contraire, ne laissent pas subsister du métal fondu brut de solidification (en effet, le métal fondu d'une soudure peut constituer un point faible en ce qui concerne certaines propriétés mécaniques, notamment la résilience et la limite d'élasticité après traitement thermique). On trouve ainsi, parmi les premiers, tous les procédés de soudage par fusion (arc, plasma, faisceau d'électrons, laser, résistance par point) et, parmi les seconds, un certain nombre de procédés intéressants pour le mécanicien (étincelage, friction, diffusion).

3.1 Soudage avec métal fondu subsistant

3.1.1 Soudage à l'arc et au plasma

Nombre des aciers considérés ici ont une teneur en carbone qui peut atteindre, voire dépasser, 0,3 % et par ailleurs ont, au moins pour certains d'entre eux, une trempabilité élevée. Dans ces conditions, le risque de fissuration à froid peut être grand en présence d'hydrogène.

Il est intéressant de noter que, dans la classification habituelle des aciers en fonction de leur soudabilité, ceux dont il est question ici se classent pour la plupart (document AFNOR FD E 83-100-3) :

— en catégorie 2 : aciers devant être soudés en absence d'hydrogène et nécessitant un préchauffage et un postchauffage ;
— ou en catégorie 3 : aciers dont le soudage est à éviter ; compte tenu des risques importants de fissuration.

Seuls quelques-uns d'entre eux, tels C30, C35, 16MnCr4, 18CrMo4, 16NiCr4 et 10NiCr5-4, se classent en catégorie 1 (aciers à souder avec bas hydrogène et préchauffage) et un plus petit nombre encore, tels C10, C15, C16 en catégorie 0 (aciers sans problème particulier, à souder avec des procédés à bas hydrogène quand l'épaisseur dépasse 20 mm).

La figure **10** permet d'interpréter ce classement en fonction de la teneur en carbone d'une part et, d'autre part, de la somme des termes qui, dans la formule de carbone équivalent, fait intervenir les éléments d'alliage :

$$[Mn\%/6] + [(Cr\% + Mo\% + V\%)/5] + [(Ni\% + Cr\%)/15] = C_{eq} - C\%$$

L'emploi des procédés à bas hydrogène est donc indispensable. La mise en œuvre, dans la mesure du possible, d'une énergie élevée est préférable.

Les procédés qui confèrent au joint un bel état de surface et des raccordements très progressifs [MAG (*Metal Active Gas*), fils fourrés sous gaz, flux en poudre...] seront préférés ; ils permettent en effet d'assurer une meilleure tenue mécanique de l'assemblage (rupture fragile, fatigue).

3.1.2 Soudage à haute énergie

Ces procédés, qui font intervenir un faisceau d'électrons ou un faisceau de lumière cohérente (laser), ont l'avantage de créer des cordons peu épais et des ZAC (zone affectée par la chaleur) étroites, ce qui limite l'amplitude des déformations et le niveau des contraintes résiduelles. Ils peuvent permettre le soudage de pièces de géométrie complexe.

Ils s'appliquent à tous les aciers considérés ici.

3.1.3 Soudage par résistance par point

Appliqué seulement au produits plats minces, ce procédé permet de réaliser l'assemblage d'éléments préformés. La tenue mécanique dépend de l'état structural du métal fondu de chaque point

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

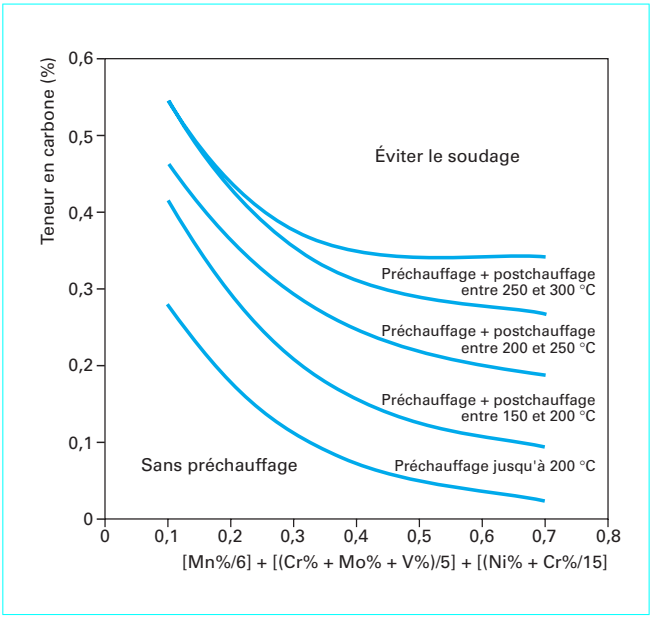


Figure 10 – Description schématique de la soudabilité métallurgique des aciers

qui, compte tenu des aciers considérés ici, est généralement martensitique. Il est bon alors de moduler les conditions de refroidissement de chaque point pour diminuer sa fragilité.

3.2 Soudage sans métal fondu subsistant

3.2.1 Soudage par étincelage en bout

Le procédé de soudage en bout par étincelage est très utilisé en mécanique. Il autorise le soudage de fortes sections avec des cycles thermiques relativement lents ; le risque de formation de structures peu ductiles (compte tenu de certaines teneurs en C) est donc atténué, mais le grossissement des grains dans la ZAC (zone affectée par la chaleur) peut être important ; le traitement thermique final permet de résorber ce défaut.

Il exige par ailleurs, pour la bonne tenue mécanique des assemblages, une opération d'usinage qui élimine le bourrelet formé lors du refoulement.

Il s'applique à tous les aciers considérés ici et autorise les soudages hétérogènes. La source de courant peut être utilisée pour réaliser des traitements thermiques complémentaires (postchauffage, recuit).

3.2.2 Soudage par friction

Ce procédé exige qu'une des deux parties de l'assemblage soit constituée d'une pièce qui puisse être mise en rotation. Le joint ne contient pas de métal brut de solidification, ce qui améliore ses performances mécaniques.

Très comparable au soudage par étincelage, il exige, comme lui, un usinage pour enlever le bourrelet.

Il s'applique à tous les aciers considérés ici et permet de réaliser des soudages hétérogènes.

3.2.3 Soudage par diffusion

Il a été montré [17] que ce procédé judicieusement piloté permettait le soudage rapide (quelques secondes) de pièces mécaniques tout en respectant la qualité métallurgique des aciers de base (température de chauffage ne dépassant pas 1 050 °C), les déformations induites sont très limitées. Des traitements thermiques peuvent être couplés avec le cycle thermique de soudage.

L'utilisation du procédé se heurte à la nécessité de préparer les surfaces à assembler et de procéder sous atmosphère neutre ou sous vide. Mais le principal obstacle est la non-disponibilité de machine de soudage par diffusion.

4. Traitements thermiques

Les traitements thermiques sont, bien évidemment, la clé donnant accès à l'ensemble des performances des aciers présentés ici (cf. § 1 et figure 1 de l'article [M 4 530]. Les phénomènes qu'ils mettent en jeu, ainsi que les conditions de leur réalisation, sont décrits dans les articles [M 1 115] *Transformations dans les aciers, Traitements thermiques des aciers de construction* et [M 1 205] *Traitements thermiques superficiels des aciers.*

Nous nous limiterons ici à rappeler brièvement quels sont les principaux types de traitements thermiques, quelles sont leurs particularités et ce que l'utilisateur peut en attendre, en les classant en fonction de leur but :

— adoucir le métal pour que sa mise en œuvre soit facilitée ;
— durcir le métal pour lui conférer des propriétés qui rendent la pièce finie apte au service prévu ;
— obtenir certains résultats particuliers.

4.1 Traitements d'adoucissement

On doit distinguer ici différentes procédures convenant chacune à des conditions particulières de mise en œuvre.

4.1.1 Recuit d'adoucissement maximal pour le formage à froid

Ce recuit doit conduire à une structure généralement dite globulisée (ou coalescée ou sphéroïdisée) dans laquelle les carbures ont pris une forme sphérique stable ; il conduit pratiquement aux valeurs minimales de la limite d'élasticité et de la résistance du métal.

Ce traitement comporte un maintien prolongé à une température très légèrement inférieure à Ac_1 [voir diagramme TTT (température temps transformation) ou TRC (transformation en refroidissement continu)]. Il est parfois possible de le faire précéder (et cela permet de réduire la durée du maintien à la température définie ci-avant) par un chauffage à une température légèrement supérieure à Ac_1 (de 10 à 20 °C). Dans des cas difficiles, on peut faire osciller plusieurs fois la température entre les niveaux qui viennent d'être définis.

4.1.2 Recuit isotherme pour usinage

Ce recuit doit conduire à une structure à petits grains de ferrite et à perlite fine (suivant le mode d'usinage, l'état structural souhaité peut être différent).

Il comporte une austénitisation réalisée dans les conditions habituelles pour l'acier suivie d'un refroidissement interrompu par un maintien à une température à laquelle la transformation de l'austénite donnera la structure ferrito-perlitique souhaitée.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

Les conditions de ce traitement se définissent donc directement à partir du diagramme TTT de l'acier qui permet :

— de choisir la température de maintien afin que la durée de celui-ci ne soit pas trop longue et donc coûteuse, étant entendu que la structure ferrite-perlite sera d'autant plus fine que cette température sera plus basse dans les limites fixées par le diagramme (il faut éviter la formation de bainite) ;

— de définir la durée de maintien en prenant la marge de sécurité nécessaire ;

— de se faire une idée du niveau qu'atteindra ensuite la dureté de l'acier.

Ajoutons que le report sur le diagramme TRC (transformation en refroidissement continu) des lois de refroidissement réalisées entre la température d'austénitisation et la température de maintien (ce refroidissement devrait être, théoriquement, instantané) permet de vérifier si la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ ne débute pas en un point quelconque de la pièce avant que celle-ci soit parvenue à la température de maintien, ce qui aurait pour effet de provoquer la formation en ce point d'une structure plus grossière et montrerait qu'il est nécessaire d'accélérer ce refroidissement.

4.1.3 Traitement d'adoucissement banal

Ce traitement a pour objet d'abaisser simplement la dureté du métal. Les conditions dans lesquelles il sera réalisé dépendront de l'acier, de son état avant traitement et du résultat recherché.

En général, il comporte un chauffage à une température légèrement inférieure à Ac_1 (voir le diagramme TTT), suivi d'un refroidissement très lent jusqu'à environ 550 °C. Le refroidissement ultérieur peut être plus rapide (si le réglage de la température a été tel que la transformation des plages perlitiques n'a pas commencé). L'état structural obtenu est celui décrit par les normes NF EN 10083 et NF EN 10084 sous la référence +A.

4.1.4 Traitement thermique particulier

Dans certains cas, et notamment lorsque la structure d'un acier avant traitement thermique final est grossière (état globulisé, état brut de forge, etc.), le mécanicien peut souhaiter conférer au métal une structure plus fine qui facilitera la réalisation du traitement thermique ultérieur et améliorera le niveau des propriétés obtenues. Ce résultat sera acquis en faisant subir à l'acier un traitement d'affinage structural qui comprendra, généralement, un chauffage jusqu'à une température juste suffisante pour que l'austénitisation soit complète, suivi d'un refroidissement dans des conditions convenables pour obtenir une structure ferrito-perlitique fine (voir diagramme TRC en tenant compte de la modification des conditions d'austénitisation qui, généralement, va diminuer la trempabilité). Souvent, pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, le refroidissement à l'air satisfait aux conditions imposées et l'on dit alors que l'on réalise une normalisation.

4.2 Traitements conférant des propriétés d'emploi dans la masse

Ces traitements comprennent deux opérations :

— la trempe après austénitisation ;

— le revenu après trempe.

4.2.1 Trempe après austénitisation

Cette opération consiste à refroidir un acier, préalablement porté à l'état austénitique au cours d'un chauffage à température élevée, dans des conditions telles (trempe) qu'après refroidissement sa structure soit formée de martensite (et éventuellement d'un peu de bainite).

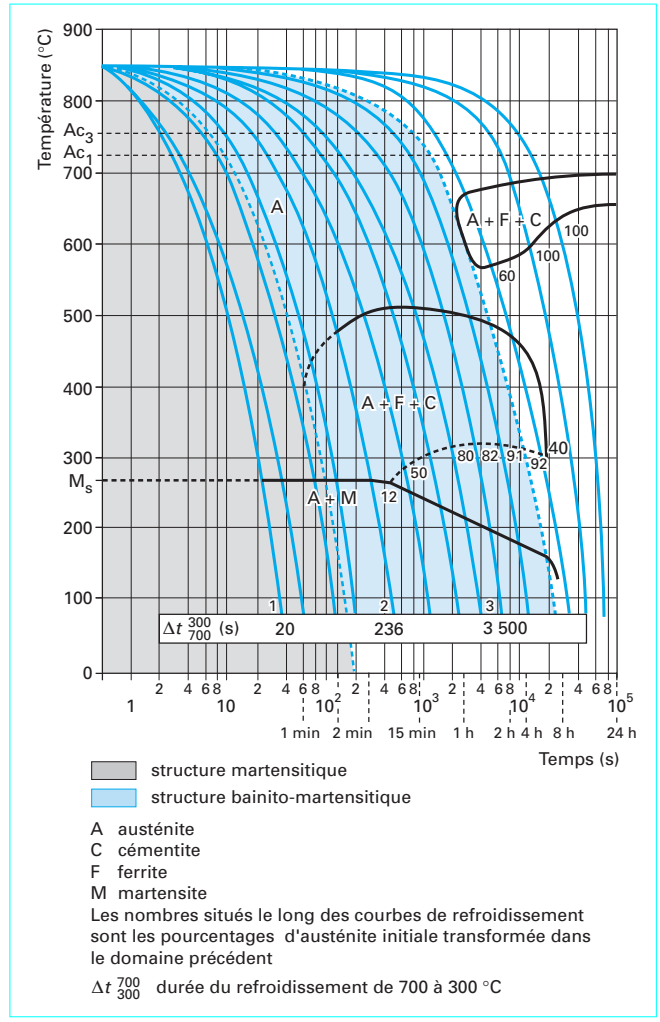


Figure 11 – Détermination des conditions de refroidissement permettant de réaliser un durcissement par trempe avec formation d'une structure martensitique ou bainito-martensitique

Le diagramme TRC de l'acier permet de définir, pour la procédure d'austénitisation correspondante, les conditions de refroidissement qui assureront un tel résultat (figure **11**).

La définition des conditions de refroidissement qui doivent être réalisées pour permettre l'obtention de structures martensitiques ou mixtes (partiellement bainitiques) pose le problème de l'effet de masse. En effet, lorsque l'on refroidit un solide, le refroidissement à cœur est plus lent qu'en peau et cela d'autant plus que la section du corps considéré est grande et le milieu de refroidissement plus énergique. Or, lors de la réalisation de la trempe, il faudra obtenir dans la masse des conditions de refroidissement satisfaisant aux impératifs définis à l'aide du diagramme TRC, faute de quoi on constaterait une dégradation à cœur des propriétés de l'acier.

La nécessité de satisfaire à cette exigence peut conduire à choisir une nuance requérant des conditions de refroidissement moins sévères, c'est-à-dire une nuance dont la trempabilité soit plus grande (acier plus trempant).

La norme NF EN 10083-1 donne des indications sur les températures d'austénitisation et les milieux de trempe qui doivent être utilisés ; elles sont rappelées dans le tableau **2** suivant.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

Tableau 2 – Conditions de trempe pour les aciers de la norme NF EN 10083-1

Aciers non alliés			Aciers alliés		
Nuance	**Température d'austénitisation** (°C)	**Milieu de trempe** (*)	**Nuance**	**Température d'austénitisation** (°C)	**Milieu de trempe** (*)
C22	860 à 900	E	34Cr4	830 à 870	E ou H
C25	860 à 900	E	37Cr4	825 à 865	H ou E
C30	850 à 890	E	41Cr4	820 à 860	H ou E
C35	840 à 880	E ou H	25CrMo4	840 à 880	E ou H
C40	830 à 870	E ou H	34CrMo4	830 à 870	H ou E
C45	820 à 860	E ou H	42CrMo4	820 à 860	H ou E
C50	810 à 850	H ou E	50CrMo4	820 à 860	H
C55	805 à 845	H ou E	36CrNiMo4	820 à 850	H ou E
C60	800 à 840	H ou E	34CrNiMo6	830 à 860	H
28Mn6	830 à 870	E ou H	30CrNiMo8	830 à 860	H
38Cr2	830 à 870	H ou E	36CrNiMo16	865 à 885	A ou H
46Cr2	820 à 860	H ou E	51CrV4	820 à 860	H

(*) E = eau H = huile A = air.

Une des conséquences de l'effet de masse est que les caractéristiques mécaniques mesurées sur éprouvettes traitées isolément ne sont pas celles des pièces traitées de masses et sections différentes.

Les différences de refroidissement dans la section d'une pièce créent des différences de température qui vont être responsables :

— de déformations dues aux différences de dilatation ;

— de décalages chronologiques dans le déroulement des transformations et, donc, dans l'apparition des anomalies de dilatation correspondantes.

Ces phénomènes engendrent, d'une part, des déformations irréversibles des pièces, d'autre part, des contraintes susceptibles de provoquer éventuellement des tapures et cela d'autant plus que les refroidissements sont rapides et la section des pièces importante.

Pour pallier ces inconvénients, on réalise parfois une trempe étagée martensitique qui est une trempe au cours de laquelle on interrompt momentanément le refroidissement par un maintien dans un milieu à température légèrement supérieure à M_s (température de début de la transformation martensitique), la durée de ce maintien étant assez courte pour éviter toute transformation de l'austénite en bainite. Ce maintien permet de réduire les écarts de température dans les pièces avant de réaliser la transformation martensitique au cours du refroidissement qui suit.

Le diagramme TRC permet ici de définir les conditions de refroidissement qui éviteront toute transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ avant l'arrivée à la température de maintien choisie (et donc aussi de juger de la faisabilité de ce traitement dans les conditions considérées).

4.2.2 Revenu après trempe

Il est nécessaire, après un durcissement par trempe conduisant à la dureté maximale de l'acier, mais aussi à une fragilité d'autant plus grande que ce dernier est riche en carbone, de provoquer une précipitation de carbures, précipitation qui aura pour conséquences :

— de stabiliser la structure pour éviter toute évolution en service (évolution qui modifierait les propriétés mécaniques des pièces) ;

— de rendre au métal une certaine ductilité qui assurera la sécurité en service.

Cette opération qui adoucit l'acier trempé est le revenu, traitement thermique auquel on soumet un acier à la suite d'un durcissement par trempe pour amener ses propriétés aux niveaux souhaités.

Ce revenu comporte un chauffage à une température déterminée toujours inférieure à Ac_1 avec maintien à cette température puis refroidissement selon des modes et lois appropriés.

Dans la pratique, on peut classer les différentes conditions des revenus auxquels on soumet les aciers de traitements thermiques utilisés en mécanique en trois classes :

— le revenu dit de détente ;
— le revenu (banal) ;
— le revenu de durcissement secondaire.

4.2.2.1 Revenu de détente

Il est effectué à une température généralement inférieure à 220 °C sur des structures totalement ou partiellement martensitiques. Il provoque un début de précipitation du carbone. Cette évolution permet à la maille de la martensite de perdre partiellement son caractère tétragonal et engendre de ce fait une relaxation des tensions propres existant à l'échelle de cette maille. Dans ces conditions, il provoque une baisse très modérée de la résistance à la traction, mais par contre une remontée très sensible de la limite d'élasticité due à la relaxation des tensions (par voie de conséquence, la dureté qui dépend de ces deux grandeurs ne varie pas sensiblement). Par contre, les caractéristiques de ductilité sont légèrement améliorées.

Ce revenu de détente est parfois pratiqué sur des pièces en acier à haute résistance fortement sollicitées, mais qui ne sont pas soumises à des conditions de travail pouvant engendrer une rupture brutale.

4.2.2.2 Revenu banal

Ce revenu réalisé à une température généralement comprise entre 525 et 550 °C provoque la précipitation complète du carbone

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

sous la forme de carbures. Il permet donc de redonner à l'acier une ductilité importante au prix d'un abaissement sensible de ses caractéristiques de résistance, ces effets croissant avec la température. Après durcissement par trempe, ce revenu permet de trouver le meilleur compromis, eu égard aux conditions d'emploi, entre le niveau des caractéristiques de résistance [R_m (résistance à la traction), R_e (limite d'élasticité), dureté] et celui des caractéristiques de ductilité [A (allongement), Z (coefficient de striction), K (résilience)].

Les conditions dans lesquelles il sera réalisé dépendent non seulement du compromis recherché, mais aussi du comportement propre de l'acier, fonction lui-même de sa composition et de son état de durcissement par trempe.

Aussi, dans la pratique industrielle, l'utilisateur a-t-il intérêt à se reporter aux documents indiquant l'évolution des caractéristiques mécaniques de la nuance considérée en fonction de la température de revenu. De telles informations figurent dans les catalogues des sociétés sidérurgiques ainsi que, pour un nombre croissant de nuances, dans les dossiers techniques publiés par l'OTUA.

L'effet de la durée du maintien à la température de revenu est semblable à celui de cette dernière, quoique à échelle moindre. On pourra donc, dans une certaine mesure, pour obtenir un même résultat, faire varier en sens inverse température et durée de maintien. Des formules paramétriques permettent de déterminer approximativement les couples température/durée de maintien équivalents dans des domaines de variation limités (cf. article [M 1 115] *Transformations dans les aciers*).

4.2.2.3 Revenu de durcissement secondaire

Ce revenu généralement réalisé entre 600 et 650 °C, provoque la précipitation, dans les aciers qui contiennent les éléments d'alliage nécessaires (éléments carburigènes) de carbures fins alliés tels que Mo_2C, V_4C_3, W_2C ou TiC ; on assiste alors à un relèvement des caractéristiques de résistance de l'acier d'autant plus important que l'austénite avant trempe était plus riche en carbone et en éléments d'alliages carburigènes mis en solution. Simultanément, les caractéristiques de ductilité sont abaissées. Le maximum de durcissement et de fragilisation est généralement atteint vers 600 °C. Au-delà de cette température, la coalescence des précipités va provoquer un adoucissement accompagné d'une amélioration des caractéristiques de ductilité et, habituellement, le compromis entre les niveaux de ces propriétés sera recherché en effectuant le revenu entre 600 et 650 °C. Ce durcissement dit secondaire permet de garder à l'acier des performances de résistance assez élevées tout en stabilisant la structure en vue d'un emploi à chaud.

4.3 Traitements conférant des propriétés d'emploi au voisinage de la surface

Ces traitements thermiques ont pour objet d'améliorer les performances mécaniques des pièces sollicitées principalement au voisinage de leur surface et d'accroître ainsi, par exemple :

— leur endurance sous contraintes non uniformes (flexion, torsion) ;

— leur tenue à la fatigue-roulement sous fortes charges, ce qui permet d'éviter les écaillages ;

— leur résistance à l'usure.

D'autre part, ces traitements ont des avantages particuliers :

— ils permettent d'obtenir des caractéristiques mécaniques très élevées en surface tout en conservant à cœur une ductilité qui assure la sécurité du fonctionnement ;

— les conditions de mise en forme ne sont pas affectées par ces procédés qui n'interviennent qu'aux derniers stades de la réalisation des pièces ;

— le traitement des seules parties fonctionnelles permet d'économiser l'énergie et parfois d'utiliser des aciers moins coûteux.

On peut distinguer deux grandes catégories dans ces traitements superficiels :

— le durcissement par trempe après chauffage superficiel ;

— les traitements thermochimiques qui modifient la composition du métal au voisinage de sa surface.

4.3.1 Durcissement par trempe après chauffage superficiel

Cette technique, couramment appelée **trempe superficielle** permet d'obtenir en surface des duretés élevées et de générer des contraintes résiduelles favorables, tout en conservant à la sous-couche une bonne ténacité. Elle est décrite dans l'article [M 1 205] *Traitements thermiques superficiels des aciers*.

La trempe superficielle se fait sans modification chimique de la surface de la pièce. Elle exige donc l'emploi d'aciers contenant assez de carbone (en général C% > 0,30) pour atteindre en surface les duretés recherchées après trempe.

Les pièces destinées à la trempe superficielle sont chauffées sur la totalité ou sur une partie de leur surface au-dessus de Ac_3 durant un temps très court et immédiatement refroidies au moyen de jets d'eau sous pression. Ces conditions d'austénitisation conduisent souvent à porter la surface des pièces à des températures plus élevées que les températures d'austénitisation habituelles, cela pour compenser la très faible durée du cycle thermique.

Dans la plupart des cas et plus particulièrement pour la trempe en série, le chauffage se fait électriquement au moyen de courants induits de moyenne ou haute fréquence allant de 1 000 à plusieurs millions de hertz. Pour la trempe de faible série, ou de pièces unitaires, ou encore de certaines parties de pièces très volumineuses, le chauffage se fait au moyen de flammes oxyacétyléniques ou oxygène-gaz. Trois autres modes de chauffage peuvent être utilisés : la torche à plasma, le faisceau d'électrons ou le faisceau laser. L'article [M 1 205] *Traitements thermiques superficiels des aciers* détaille les avantages et les inconvénients des différents procédés. La trempe superficielle, surtout celle comportant un chauffage par induction, se prête parfaitement à l'automatisation et permet, grâce à un réglage très précis des conditions de chauffage et de refroidissement, d'obtenir des duretés et des profondeurs de trempe très régulières sur des séries de plusieurs milliers et dizaines de milliers de pièces. Des résultats uniformes ne peuvent toutefois être atteints que si les pièces trempées sont fabriquées dans un acier approprié.

La profondeur sera déterminée par l'usage et la section de la pièce. On prendra en particulier en considération le fait que la meilleure tenue à des sollicitations en service ne sera atteinte que si la couche extérieure trempée est soumise à de fortes contraintes résiduelles de compression engendrées par la trempe locale. Cette condition impose certaines limites d'épaisseur trempée par rapport à la section totale.

L'essor considérable pris par la trempe superficielle est dû aux avantages apportés par :

— l'amélioration importante de la résistance à la fatigue des pièces traitées (due aux contraintes superficielles de compression) ;

— la bonne tenue à l'usure des surfaces trempées (due à la dureté) ;

— l'absence de décarburation et une oxydation très réduite, voire nulle ;

— la facilité d'un traitement précis des parties à tremper ;

— les faibles déformations limitant les usinages de finition ;

— la grande productivité et le faible encombrement des installations, ainsi que leurs facilités d'automatisation (dans le cas d'utilisation du chauffage par induction) ;

— l'économie sur les coûts de l'acier (auquel on ne demande pas d'avoir une trempabilité permettant la trempe à cœur) ;

— l'économie du traitement qui permet de limiter la dépense énergétique.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

Il convient cependant de noter que la résistance à l'usure de la couche trempée ainsi que les contraintes de compression induites en surface sont inférieures aux valeurs obtenues avec les traitements thermochimiques tels que la cémentation, la carbonitruration ou la nitruration, ces derniers traitements permettant d'atteindre des duretés superficielles plus élevées que celles réalisées par la simple trempe.

4.3.2 Traitements thermochimiques

Dans son acceptation générale, ce terme signifie « traitements thermiques effectués dans un milieu convenablement choisi pour obtenir une modification de la composition chimique de la surface du métal de base par échange avec ce milieu ». Il faut noter que cette définition sous-entend que les modifications de composition chimique intéressent une profondeur plus ou moins grande sous la surface et qu'elles sont réalisées au cours du traitement thermique qui va donner à la pièce ses propriétés d'emploi. Ces traitements thermochimiques sont décrits dans l'article *Pratique des traitements thermochimiques*.

Les plus utilisés de ces traitements ont pour objet principal :

— de modifier en surface la capacité de durcissement de l'acier (cémentation, carbonitruration) de telle sorte qu'après trempe il présente une plus grande dureté superficielle ;

— d'augmenter la résistance à l'usure (en améliorant éventuellement les qualités de frottement) ;

— d'augmenter la résistance à la corrosion.

4.3.2.1 Cémentation

C'est un traitement thermochimique d'enrichissement superficiel en carbone qui s'applique principalement à des aciers doux contenant moins de 0,25 % de carbone.

L'opération est réalisée dans un milieu susceptible de céder du carbone à l'acier porté à l'état austénitique. Le plus souvent, la cémentation se fait entre 880 et 950 °C. Pour accélérer les réactions d'apport et de diffusion du carbone dans l'acier, on opère parfois entre 950 et 1 050 °C sur des aciers qui conservent un grain fin à ces températures (aciers « calmés » à l'aluminium notamment).

La cémentation est suivie d'une trempe soit directement à la sortie de la cémentation (trempe directe), soit après refroidissement du métal et réaustenitisation ultérieure.

La couche cémentée atteint le maximum de dureté après trempe martensitique pour des teneurs en carbone voisines de l'eutectoïde, soit de 0,7 à 0,9 %. Elle contient systématiquement de l'austénite résiduelle. La dureté après trempe se situe aux environs de 800 à 900 HV ou 64 à 67 HRC. Un revenu de détente (180/200 °C) après trempe ramène la dureté aux environs de 600 à 760 HV, ou 58 à 63 HRC.

L'épaisseur de la couche cémentée varie avec la destination et le volume de la pièce. Les épaisseurs importantes, de 0,8 à 1,8 mm ou plus, sont réservées à des pièces devant résister à l'usure et à des pièces de forte section. Pour les pièces de moyenne et faible sections, tels les engrenages d'automobiles, des épaisseurs de 0,2 à 0,8 mm sont généralement suffisantes.

Le cœur de la pièce, pauvre en carbone, conserve après trempe (et selon sa trempabilité) une structure bainitique ou perlito-bainitique, douce et tenace qui soutient la couche durcie et assure la sécurité de fonctionnement. L'interaction des propriétés complémentaires entre surface et sous-couche permet donc de réaliser des pièces à la fois dures en surface, tenaces à cœur et peu fragiles. Leur endurance est accrue par l'existence en surface de contraintes de compression.

4.3.2.2 Carbonitruration

C'est un traitement qui provoque un enrichissement de la surface de l'acier simultanément en carbone et en azote par un mécanisme analogue à celui de la cémentation.

Réalisée autrefois en bain de sels (**cyanuration**), elle l'est surtout aujourd'hui par voie gazeuse. L'apport de carbone se fait au moyen de gaz de composition proche de celle des gaz de cémentation. L'azote est apporté par des composés azotés et en particulier par l'ammoniac qui, aux températures du traitement, se dissocie. L'azote, selon la composition de l'acier est présent en solution solide d'insertion ou partiellement précipité sous forme de carbonitrures.

La carbonitruration est effectuée à des températures comprises entre 800 et 900 °C (l'acier est à l'état austénitique). La durée de l'opération, de l'ordre de 30 min à quelques heures, est inférieure à celle de la cémentation pour des épaisseurs de couche allant de 0,05 à 0,6 mm. Le traitement se faisant à des températures plus faibles permet de supprimer tout risque de surchauffe du métal et de grossissement du grain. La diffusion de l'azote et du carbone se fait à des vitesses peu différentes, mais la dissociation de l'ammoniac augmentant rapidement aux températures supérieures à 600 °C, la teneur en azote des couches carbonitrurées diminue avec l'élévation de la température, au bénéfice de la teneur en carbone. Les proportions respectives dépendent également de la composition de l'atmosphère. Dans les cas plus courants la teneur en azote des couches carbonitrurées est souvent inférieure à 0,6 %.

La trempe étant effectuée à partir de températures plus basses permet de réduire et de mieux maîtriser les déformations. Elle laisse toujours subsister de l'austénite résiduelle.

La dureté des surfaces carbonitrurées est plus élevée que celle des surfaces cémentées, il en est de même pour leur résistance à l'usure. Corrélativement, l'élévation du niveau des contraintes de compression dans les régions superficielles apporte une meilleure tenue en fatigue.

La carbonitruration peut aussi être effectuée à des températures voisines de 700 °C. Le cœur de la pièce reste alors à l'état ferrito-perlitique et c'est l'apport d'azote qui, en abaissant l'intervalle de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$, provoque l'austénitisation de la couche superficielle qui alors accepte le carbone et, ultérieurement, se transforme en martensite lors de la trempe à l'huile qui achève le traitement. La profondeur durcie est de quelques dixièmes de millimètre au maximum.

4.3.2.3 Nitruration

C'est un traitement thermochimique d'enrichissement superficiel en azote qui est réalisé dans un milieu (contenant de l'ammoniac) susceptible de céder cet élément à l'acier.

La solubilité de l'azote dans le fer α, à partir de 500 °C, est très supérieure à celle du carbone ; à 590 °C elle atteint 0,10 % (contre 0,005 % pour le carbone à la même température). Cet état de fait permet de nitrurer les aciers en les maintenant à l'état α ; ainsi, il n'est donc pas nécessaire d'effectuer une trempe après nitruration ce qui présente l'avantage de simplifier les opérations et d'éliminer certains risques (tapures, déformations, austénite résiduelle). La nitruration des aciers peut donc se faire sur un métal ayant subi au préalable un traitement thermique de trempe et de revenu et possédant des caractéristiques mécaniques élevées (la température de revenu doit alors être supérieure à la température de nitruration, mais la nitruration peut aussi faire fonction de revenu).

Après nitruration, l'azote peut se trouver dans des états différents :

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques

— en **solution solide d'insertion dans le réseau cristallin du fer** α ; il forme alors la couche de diffusion (dont l'épaisseur est généralement de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres). Cette insertion produit un durcissement limité (dureté inférieure à 500 HV) de l'acier et améliore la résistance à la fatigue ;

— en **combinaison avec le fer sous forme de nitrure** Fe_cN (γ') ou Fe_xN (ε) (avec $2 < x < 3$). Ces nitrures forment, en extrême surface, une couche de combinaison très dure dont l'épaisseur peut atteindre 30 µm. Cette couche apporte une amélioration très notable de la résistance à l'usure et des propriétés de frottement ;

— en **combinaison avec certains éléments d'alliage**, tels que le chrome, le molybdène, l'aluminium ou le vanadium, sous forme nitrures bien plus durs que ceux de fer. Dans ce cas les nitrures sont précipités dans la couche de diffusion et la couche de combinaison peut ne pas se former.

La dureté de la couche de combinaison formée sur les aciers non alliés peut varier de 500 à 1 000 $HV_{0,1}$; celle formée sur les aciers alliés atteint 950 à 1 100 $HV_{0,1}$. La dureté de la couche de diffusion est faible sur les aciers non alliés (300 à 400 HV), mais elle peut atteindre des niveaux élevés avec des aciers alliés (400 à 1 400 HV). Le traitement de nitruration est donc particulièrement recommandé pour toutes les pièces devant présenter une très grande résistance à l'usure par frottement dans la mesure où ces pièces ne travaillent pas au choc. Les bonnes qualités de frottement peuvent être conservées jusqu'à des températures atteignant 550 et 600 °C.

La nitruration élève également de façon notable la limite d'endurance d'une pièce grâce à l'augmentation considérable de la dureté superficielle et à l'introduction en surface de contraintes de compression favorables. Cette opération convient plus particulièrement pour des pièces très sollicitées en fatigue, telles que les vilebrequins très chargés. Elle présente l'avantage sur la trempe par induction de pénétrer dans le fond des filetages, entailles ou rainures, et de réduire ainsi l'action très défavorable de ces discontinuités de géométrie sur la limite d'endurance des pièces.

La nitruration peut aussi améliorer la résistance à la corrosion atmosphérique, à celles de l'eau douce, des hydrocarbures et de certains produits de combustion.

4.3.2.4 Boruration

C'est un traitement thermochimique d'enrichissement superficiel en bore qui est réalisé en milieu (contenant du carbure de bore) susceptible de céder cet élément à l'acier (grâce à un activateur, un fluoborate).

Le bore forme en surface des pièces des borures de fer Fe_2B et FeB. Le composé visé est Fe_2B moins fragile que FeB. La dureté obtenue est de l'ordre de 2 000 HV ; c'est la plus élevée de toutes celles réalisées par traitements thermochimiques de l'acier. De ce fait, la boruration confère à l'acier une très grande résistance à l'usure, particulièrement par abrasion.

La boruration présente toutefois le handicap de se pratiquer à haute température entre 800 et 1 050 °C ; il est donc nécessaire d'effectuer ultérieurement un traitement de trempe et revenu pour donner aux pièces leurs caractéristiques d'emploi.

4.3.2.5 Traitements d'amélioration des conditions de frottement

Ces traitements ont pour objet d'apporter à la surface des pièces soumises à des frottements des éléments qui améliorent les conditions de frottement et diminuent l'usure.

Sulfurations à basse température

Elles consistent à introduire du soufre à la surface de l'acier au cours d'opérations conduites entre 150 et 200 °C :

— héparisation réalisée en milieu liquide à 140-150 °C ;

— SULF-BT réalisé en bain d'électrolyse (pièces à l'anode) à 185-195 °C ;

— sulfuration ionique exécutée à 200 °C.

Après sulfuration, les pièces ne subissent pas d'autre traitement thermique.

Apports d'étain et/ou de cuivre à chaud

● **Stanal** : traitement de thermodiffusion d'étain vers 600 °C à la surface d'une pièce en acier. Les couches successives de diffusion contiennent des composés métalliques malléables, tels que $FeSn_2$ et FeSn et un composé dur Fe_3Sn. Ce traitement permet de résoudre les problèmes combinés d'usure, de grippage et de corrosion d'organes en aciers.

● **Forez** : ce traitement réalise une diffusion sélective vers 600 °C d'étain et de cuivre conduisant, en partant de la surface, aux couches suivantes :

— une couche superficielle très mince à base d'étain (68 %) chargée d'inhiber toute possibilité de grippage par soudure avec la surface antagoniste ;

— une couche dure et ductile de cuivre-étain résistant aux contraintes et pressions en service et susceptible d'alimenter en étain la couche supérieure inhibitrice de microsoudure ;

— une couche de transition à concentration décroissante en métaux d'apport.

L'enrichissement superficiel en étain et en cuivre permet le remplacement, dans certains cas, du bronze par de l'acier traité.

4.3.2.6 Traitements d'amélioration de la tenue à la corrosion

L'**aluminisation** vise à former en surface une couche d'aluminium ou d'alliage d'aluminium en vue d'améliorer la résistance à l'oxydation à chaud. On appelle **calorisation** une aluminisation suivie d'une opération de diffusion à chaud de l'aluminium vers l'intérieur de la pièce.

La **chromisation** (ne pas confondre avec le chromage électrolytique) est un enrichissement superficiel en chrome avec diffusion vers l'intérieur. La couche chromisée contenant en surface 40 % environ de chrome confère à l'acier une bonne résistance à la corrosion dans divers milieux.

La **shérardisation** est un traitement thermochimique d'enrichissement superficiel en zinc en vue d'améliorer la résistance à la corrosion en atmosphères polluées.

La **siliciuration** vise un enrichissement superficiel et une diffusion de silicium. On réalise ainsi une couche très dure contenant 12 à 14 % de silicium et résistant à la corrosion par des acides non oxydants, tels que les acides chlorhydrique et sulfurique, et à l'oxydation à l'air, jusqu'à des températures de 875 °C.

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite.
©Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques